B106 スターリングエンジンを用いた排熱回収システムの実海域フィールド試験

Test Result of Heat Recovery System with Stirling Engine Generators on Ship

○正 平田 宏一 (海技研) 飯田 光利 (東海運) 赤澤 輝行 (e スター)

Koichi HIRATA, National Maritime Research Institute, Shinkawa 6-38-1, Mitaka, Tokyo
Mitsutoshi IIDA, Azuma Ship Co., Ltd., Tokyo
Teruyuki AKAZAWA, e Stir Co., Ltd., Nara

When a freight ship is in a harbor, a Diesel engine generator is operated to supply electric energy in the ship. Exhaust gas from the Diesel engine causes air pollution in the harbor area. In order to solve the air pollution, we have tried to develop a heat recovery system with Stirling engine generators. In this paper, we report a composition of the heat recovery system and a control system for the Stirling engine, experimental results of the Stirling engine generators with exhaust gas from a Diesel engine in our laboratory, and operating results of field tests on a ship.

Key Words: Stirling Engine, Waste Heat Recovery System, Ship and Marine Diesel Engine

1. はじめに

停泊している船舶のディーゼルエンジンから放出される排ガスは、港湾地域の大气環境汚染の原因となっている。著者らは、その解決策の一つとして、運航中のディーゼルエンジンから放出される排熱をスターリングエンジン発電機によって回収する排熱回収システムの開発を進めてきた。本排熱回収システムは、スターリングエンジンで得られた電気エネルギーを船内に搭載したバッテリーに蓄え、停泊時の船内電力として供給する。このようなシステムを開発することで、停泊時に運転しているディーゼル発電機の排ガスを削減でき、港湾内の環境保全に貢献できるものと期待されている。

前報¹⁾では、本研究で開発した排熱利用スターリングエンジンの運転結果や実海域におけるフィールド試験の準備状況について概説した。本報では、排熱回収システムおよび制御システムの基本構成について述べ、3 台のスターリングエンジンを直列に配置した際の陸上試験結果並びに実海域におけるフィールド試験の結果について記す。

2. 排熱回収システムの開発

本研究は 2005 年に始まり、現在までに 3 台のスターリングエンジンを設計・試作した。さらに、バッテリーへの充電システムやスターリングエンジンの制御システムの検討・開発を進めてきた。

2.1 排熱利用スターリングエンジン

本排熱回収システムでは、排気管中に複数のスターリン

グエンジンを直列に配置する。図 1 は、本研究で開発した排熱利用スターリングエンジンの外観である。1 号機および 2 号機は、排ガスを模擬した高温空気を並びにディーゼルエンジンの排ガスを熱源として、それぞれ 1000 時間程度の運転を行っており、エンジンの基本性能を調べるとともに耐久性や信頼性などを調べる運転を行ってきた。2007 年に設計・試作した 3 号機は製作コストの低減および長寿命化を目指した構造としている。表 1 にこれらのエンジンの主な仕様を示す。また、前報¹⁾の運転時には、スターリング

Table 1 Specifications and Target Performance

	1st Prototype	2nd Prototype 3rd Prototype
Engine Type	Beta type	
Piston Diameter	100 mm	
Displacer Stroke	36 mm	32 mm
Power Piston Stroke	28 mm	28 mm
Working Gas	Helium	
Mean Pressure	2~4 MPa	
Target Power	500 W / 1000rpm	
Generator	PM Generator

Fig.1 Photograph of Stirling Engine Generators

Fig.2 Outline of Waste Heat Recovery System

エンジンに誘導式発電機を取り付けていたが、以下の運転においては定格運転条件（500 W, 1000 rpm）において発電機効率が 86 % 程度の磁石埋込式発電機を用いている。

2.2 排熱回収システムの基本構成

図 2 に本排熱回収システムの基本構成を示す。運転時、スターリングエンジンに組み込まれた磁石埋込式発電機からは電圧 200～300 V 程度の三相交流が発生する。この発電出力は、ダイオードモジュールによって直流に変換された後、太陽電池用パワーコンディショナ（オムロン社、KP40F-W）に入力され、通常の商用電源と同様の電圧 100 V の単相交流が得られる。後述するフィールド試験においては、市販のバッテリー充電器（木阪製作所、パスチャージャ 10 MP0210）を用いて、複数の鉛式バッテリー（AC デルコ社、ボイジャー M30HMF、容量 115 Ah）を充電している。

本排熱回収システムにおいて船舶に搭載するバッテリーの容量はかなり大きい。大容量のバッテリーに対応した専用充電器についての調査・検討はしたもの開発には至らなかった。そのため、以下のフィールド試験では、18 個のバッテリー（総容量約 25 kWh）を市販の充電器によって 1 個ずつ個別に充電している。また、3 台のスターリングエンジンを同時に運転した場合の詳細な電気的特性が不明であったため、それぞれのエンジンに対して 1 台ずつのパワーコンディショナを用いている。本システムに適した充電システムの開発ができれば、よりシンプルかつ高性能なシステムを構築できるものと考えられる。

2.3 制御システムの開発

本排熱回収システムはディーゼルエンジンの排ガスを熱源とするため、排ガス流量および排ガス温度などのスターリングエンジンへの入熱条件はディーゼルエンジンの運転条件により決められる。また、スターリングエンジンにより得られる発電出力はバッテリーの充電に使われるので、充電終了時には大きな負荷変動が生じる。すなわち、スターリングエンジンを適切な回転数で運転するためには、入力や出力の変動に対応するための制御システムが必要となる。図 3 にスターリングエンジンの制御回路の概略を示す。本制御回路には、負荷変動に対応するための 6 本の固定抵抗器が取り付けられており、図 2 に示したようにバッテリーへの充電システムとは別に取り付けられる。計測・制御用パソコンでは、目標の回転数を維持するように各抵抗器に接続したリレーを制御する。

6 本の抵抗器はそれぞれ約 2 倍ずつの抵抗値としてあり、消費電力を 64 段階（ $=2^6$ ）に調整できる。パソコンの計

Fig.3 Control Circuit for Stirling Engine

測・制御プログラムは、回転数を 1 秒間隔で測定するとともに、回転数の目標値との相違を判断し、 $\pm 50 \sim 100$ rpm の差がある場合は抵抗値を 1 段階、 ± 100 rpm 以上の差がある場合は抵抗値を 3 段階変化させる。

3. ディーゼル排ガスを用いた陸上予備試験の概要

以上に述べた制御システムの開発と同時に、ディーゼル排ガスを用いてスターリングエンジンを運転し、出力特性を調べている。以下、実海域におけるフィールド試験の実施に先立って実施した陸上予備試験について述べる²⁾。

3.1 運転条件

表 2 に陸上予備試験に用いたディーゼルエンジンの仕様を示す。以下の運転においては、ディーゼルエンジンを定格回転数 420 rpm で運転し、水動力計による負荷を調整して排ガス温度を変化させている。図 1 に示したように排ガスの上流側から 2 号機、3 号機、1 号機の順番にスターリングエンジンを配置し、それぞれの回転数を 1100 rpm, 1000 rpm, 950 rpm としている。

3.2 試験結果

図 4 にディーゼルエンジンの排ガス温度に対する各スターリングエンジンの発電出力、排ガス熱量および各スターリングエンジンの膨脹空間内作動ガス温度の測定結果を示す。これより、400℃の排ガスで 1.3 kW、450℃の排ガス

Table 2 Specifications of Marine Diesel Engine

Engine Type	Matsui MU323DGSC (3 cylinder, 4 stroke)
Cylinder Bore	230 mm
Piston Stroke	380 mm
Rated Power	257 kW (350 PS)
Rated Engine Speed	420 rpm
Fuel	Heavy Oil (A)

Fig.4 Experimental Results

Fig.4 Experimental Results

で 1.7 kW の総発電出力が得られていることがわかる。また、膨脹空間内作動ガス温度は上流側から下流側のエンジンにかけて徐々に低下しており、上流に設置されたスターリングエンジンの作動ガス温度は排ガス温度より 80～100℃程度低下している。

図 5 は排熱回収率（全排ガス熱量に対する総発電出力の割合）およびエンジン効率（スターリングエンジンが取り入れた熱量に対する総発電出力の割合）を示している。排熱回収率は 1.5 % 程度であり、十分に高い性能とは言えない。一方、エンジン効率は排ガス温度 400℃において 6 % 程度である。

4. 実海域におけるフィールド試験

以上の排熱回収システムを開発し、3 台のスターリングエンジンをセメント運搬船「パシフィック・シーガル」のディーゼル発電機の排気管に取り付けた（図 6）。表 3 にディーゼル発電機の仕様を示す。以下、2008 年 1 月から 2 月にかけて実施した実海域における 3 回のフィールド試験について述べる。

4.1 船舶への搭載並びに運転条件

フィールド試験は通常の商用航行中に行われ、ディーゼル発電機は船舶の消費電力に見合った負荷で運転されている。上記の陸上予備試験と同様、排ガスの上流側から 2 号機、3 号機、1 号機の順番にスターリングエンジンを配置し、それぞれの回転数 1100 rpm、1000 rpm、950 rpm としている。フィールド試験中、これらの条件を概ね一定として連続運転を行った。

4.2 フィールド試験結果

(1) 東京－函館航路

2008 年 1 月、東京－函館航路において 1 回目のフィールド試験を行った。図 7 に本試験で測定した主な時系列データを示す。東京港を出航した後、3 台のスターリングエンジンの運転を開始した。初日の夜間はディーゼル発電機

Fig.6 Stirling Engines on Ship

Table 2 Specifications of Diesel Engine Generator

Engine Type	Yanmar S165L-UN X400kVA (6 cylinder, 4 stroke)
Cylinder Bore	165 mm
Piston Stroke	210 mm
Rated Power	353 kW (480 PS)
Rated Engine Speed	1200 rpm
Fuel	Heavy Oil (A)

の負荷が低く、排ガス温度が 330℃程度と低かったため、最も後流側に設置した 1 号機を発電させることはできず、総発電出力は 220 W 程度であった。2 日目からは船内消費電力を上げてディーゼル発電機を運転しており、排ガス温度は 370℃程度まで上昇した。この際、総発電出力は 650 W 程度、バッテリーに充電されるパワーコンディショナの電力は 300～400 W 程度であった。

本フィールド試験によって、東京出港から函館入港まで約 36 時間の連続発電運転を行った。さらに、函館入港後、充電したバッテリーを用いて船内電力の一部に電力供給しており、本システムの有効性を実証している。一方、制御シ

Fig.7 Results of 1st Field Test

Fig.8 Results of 2nd Field Test

Fig.9 Operating of Control System

システムが急激な負荷変動に対応できず、制御システムの動作が不安定であったなどの不具合が確認された。

(2) 田子の浦—大船渡航路

2008年2月下旬、2回目のフィールド試験を実施するため、田子の浦（静岡）において本船に乗船した。その際、2号機および3号機のヒータ下部のフランジに取り付けたOリングが破損していることが確認された。1回目のフィールド試験の後、スターリングエンジンは運転していなかったものの、船舶の通常航行中、ヒータの周囲には断続的に排ガスが流れていた。その温度変化によって、Oリングが変形・破損したものと考えられる。特に3号機のガス漏れは大きく、運転が困難であったため、本フィールド試験では2号機および1号機の2台だけを運転した。

図8は田子の浦を出港してから大船渡（岩手）に入港するまでの主な時系列データである。2回目のフィールド試験では、1回目の試験で問題が生じた制御システム並びに計測・制御プログラムを見直している。

図9は航行から2日目の2時から9時までの1号機の発電特性に関する時系列データを抜き出したものである。パワーコンディショナの電力はバッテリーへの充電状況によって徐々に低下している。それに伴って回転数は上昇しているが、目標回転数 900 ± 50 rpm の範囲を超えると制御回路の抵抗値が段階的に変化し、回転数は適切に制御されている。なお、1号機の制御システムは概ね順調に作動したものの、2号機の制御システムは不安定であり、意図した通りの自動制御には至らなかった。

(3) 大船渡—東京航路

2回目のフィールド試験の後、船上において3号機のOリングを交換した。そして、大船渡から東京までの航行において3回目のフィールド試験を実施した。図10は本試験における主な時系列データを示している。ディーゼルエンジンの運転直後からスターリングエンジンを運転し、バッテリーへの充電を開始した。また、制御システムの不具合の原因を特定することができなかったため、3台のスターリングエンジンの負荷は全て手で調節した。なお、フィールド試験終了後、陸上において制御システムを動作させたところ、不具合はなく適切に動作することが確認された。不具合の原因としては、機関室内の振動による回路や配線の接触不良が考えられるが、詳細は明らかではない。

図10より、スターリングエンジンの運転を開始してからしばらくは、600~700 Wの総発電出力で順調に運転したことがわかる。しかし、運転開始から4時間後、2号機

Fig.10 Results of 3rd Field Test

の回転数が1400 rpm程度まで上昇し、発電出力が大きく低下している。無人運転中であつたため、エンジンの不具合であつたのか、負荷側のシステムの不具合であつたのかは明確でない。いずれにしても、制御システムの重要性を改めて実感できた。

運転開始から約12時間後、パワーコンディショナを停止させた。その後、短時間ではあるが、各スターリングエンジンの電力負荷を増大させて運転した。その際の最高総発電出力は897 W、エンジン効率は3.3%、排熱回収率は0.4%であり、これらが一連のフィールド試験における本排熱回収システムの最高性能である。決して高効率・高性能な排熱回収システムとは言えないが、今までは大気に放出していた排気ガスから有効な電力を回収することが実証でき、将来の環境保全技術・省エネ技術として有望な技術であると考えている。

5. おわりに

以上、排熱回収システムの基本構成について述べ、本システムの陸上試験結果並びに実海域におけるフィールド試験の結果について述べた。一連のシステム開発においては、エンジン制御の重要性や難しさを実感できた。また、フィールド試験では実験室の運転だけではわからない多くの知見が得られるとともに、実用時に問題となる技術課題が明らかになりつつあると考えている。排熱回収システムを実用技術へと発展させるためには、信頼性の高い制御システムの開発、スターリングエンジンの運転の最適化、高出力あるいは小型軽量の低コストスターリングエンジンの開発、さらに高温熱交換器の腐食特性の向上などが必要になる。今後、陸上試験やフィールド試験の結果を踏まえて、新たな開発へとつなげていきたいと考えている。

本研究は（独）鉄道建設・運輸施設整備支援機構 基礎的研究推進制度により実施されているものであり、関係各位並びに共同研究メンバーに対し、深い感謝の意を表したい。

参考文献

- (1) 平田宏一、赤澤輝行、飯田光利、スターリングエンジンを用いた排熱回収システムの実用化検討、日本機械学会第12回動力・エネルギー技術シンポジウム講演論文集、p. 225-228 (2007)。
- (2) 平田宏一、岸武行、川田正國、飯田光利、赤澤輝行、坂口論、多段式スターリングエンジンを用いた内航船舶用排熱回収システムの性能特性、日本機械学会関東支部第14期総会講演会講演論文集、p. 429-430 (2008)。